

# 地理資訊系統在氣象資訊整合與應用之研究

呂芳川<sup>1</sup>、陳啓南<sup>2</sup>、朱昌敏<sup>1</sup>、汪建良<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南榮技術學院、<sup>2</sup>國防大學理工學院

## 摘要

台灣境內有高聳的南北向山脈且四面環海，致使台灣天氣具有多變性的特徵，尤其夏季期間的豪雨與颱風，常會造成局部性的災害，而氣象雷達即時觀測網在防災工作扮演著重要的角色，降水回波的位置及強度，提供短期定量降水與預警系統所需要的重要參考資料，所以雷達觀測所得資料的正確性與否非常重要。但由於大氣層狀的結構，常因為天氣系統的影響，造成溫度及溼度等垂直結構的不連續，而產生大氣折射現象，也造成雷達觀測的誤差。

由於經濟的發展，民生對氣象及環境資料的掌握更需精確，而觀測技術及儀器的增加，各類觀測資料的整合與運用，對地球科學研究則為一大挑戰。地理資訊系統(Geographical Information System, GIS)俱備整合三度空間資訊功能，為環境科學研究之發展趨勢，依據美國 Unidata 2008 年規劃藍圖，預計運用 GIS 分析與運用科學研究所需的空間資訊。本研究以 GIS 作為共通作業平台，設計資料轉換程式及高親和性的人機操作介面，整合氣象模式模擬結果、雷達及衛星等氣象觀測資料，除有效繪製一般天氣圖表外，更充分發揮 GIS 查詢、分析及管理空間資訊的功能，可以提供大氣科學研究在資料擷取及視覺化的新方法。

## 1. 前言

台灣位於太平洋西側且隔著台灣海峽與中國大陸的福建省相鄰。境內有高聳的南北向山脈且四面環海，致使台灣天氣具有多變性的特徵。從乾、濕季節的特徵來看，冬季降水量較少、春夏季較多。造成雨季大量降水的系統主要有鋒面、梅雨、颱風與午後對流。當這些系統影響台灣地區時，常會帶來豪雨造成局部性的災害，而成為氣象界與一般社會大眾所共同關切的氣象問題(涂與余，1997)。近年來，中央氣象局於發展短期定量降雨估計及預警系統(丘與陳，2003)中，積極使用氣象雷達所提供的即時降水回波觀測資料以提高降水預報能力。因此，雷達觀測資料的正確與否對短期天氣預報是相當重要的。

地理資訊系統(GIS, Geographic Information Systems)就特性上而言，乃是向量式(vector)或網格式(raster)圖形系統與關連式資料庫管理系統(RDBMS, relational database management system)之結合，同時兼具有資料管理與決策支援等基本功能。即應用先進的遙測(remote sensing)、全球衛星定位系統(global positioning system)、航測 photogrammetry 或自動繪圖系統等測量技術，繪製數位化之電子地圖，配合關聯式資料庫資料存取，將地形、地物之空間位相關係(Topology)與地形、地物本身具備之屬性整合於地理資訊系統中，以便讓文字及數據能以圖形化、視覺化的方式，清楚呈現出空間事物的真貌和內涵。由其發展近卅年之累積經驗，目前在地圖供應(陳 2001)、集水區分析(鄭 2004)及環境管理(謝 2005)等方面有相當成熟的應用。

氣象資訊與民生日常生活息息相關，台灣地區已有多位學者運用地理資訊系統技術進行氣象資訊之整合與運用，如擴散模擬(陳 2005)、降雨與地形關係(林 2002)、空氣品質監測(曾 2000)，但其成果只限於在地理資料的展示，並未就氣象資料有進一步的運用。Siddiqui et al. (2003)運用衛星影像及 GIS 監測森林及農作地的變遷，Ng et al.(2005)運用 GIS 顯示 911 事件後，紐約市懸浮微粒分布狀況，Wilhelmi and Brunskill(2003)提出 GIS 在氣象資料處理運用之優點及其效益，Wilhelmi and Betancourt (2005)同時呈現模式預報與觀測資料，並展示雷達觀測資料與地面機動觀測結果，提供氣象研究人員另一項視覺化成果。Yuan(2005)強調 GIS 不再只是製圖軟體，更將 GIS 應用於天氣情報、龍捲風損害分析及洪氾區地理位置分析等應用。依據美國 Unidata 2008 年的規劃藍圖，在科學研究所需空間資訊的整合上，預計以 GIS 為共同作業平台(Ramamurthy, 2005)，並藉由舉辦研討會及教育訓練等方式，介紹氣象人員運用 GIS 於地球科學研究(Shipley, 2005、Habermann, 2005)，相信 GIS 可以提供地球科學研究的最佳工具。

本研究主要目的在於運用地理資訊系統可以整合完整的空間(地理及大氣)資訊之優點，針對氣象雷達異常觀測個案進行探討，提供大氣折射效應研究與應用，除運用 GIS 對於空間資訊之建立、查詢等功能外，並在 GIS 中提供雷達波傳播過程所經大氣環境，建立射線軌跡模擬能力，以更確切掌握電磁波傳播特性。第二節為個案描述及運用氣象模式模擬，並將模擬結果於 GIS 中展現，第三節為 GIS 整合雷達及衛星觀測資料、模式模擬結果及後續應用成果，第四節為結論及未來研究方向。

## 2. 個案描述與環境重建

為隨時監控來自海面的降雨系統，中央氣象局在台灣北部五分山等四個地區建立氣象雷達觀測網(如圖 1a)，以便提供防範豪大雨先期準備時間。根據五分山氣象雷達降水回波觀測，2003 年 7 月 3 日 07 UTC 於雷達站東南方海面開始出現明顯降水回波。藉由雷達回波隨時間之動態變化，該回波由雷達站之東南側向西北方向移動。7 月 3 日 16 UTC 至 7 月 4 日 00 UTC，於台灣西北隅距五分山雷達站 100-180 km 海面，出現強度達 45dBZ 的大範圍明顯降水回波。之後，該回波逐漸減弱，直到至 7 月 4 日 06 UTC 才消失(僅顯示 7 月 3 日 18 UTC，如圖 1b)。

由氣象雷達守視標準作業程序而言，上述時間雷達降水回波明顯，最強回波達 45dBZ 狀況下，就雷達回波與降雨量關係(Z-R Relation)推論，以夏季較常出現對流性降雨估計，應導致  $28\text{mm hr}^{-1}$  的降水量(Rinehart, 1997)，然而檢驗當時台灣地區累積雨量，北部地區陸地沒有降雨紀錄(圖未示)；又由 2003 年 7 月 3 日 18 UTC 紅外線衛星雲圖觀察(圖 1c)，台灣地區僅於北部上空飄有薄雲，且雲層移動方向係由北向南，與地面風場恰好相反，顯示該雲層並非氣象雷達所觀測到的降水回波。

由以上雷達觀測資料可以得知，五分山雷達明顯降水回波發生期間，台灣地區無明顯降水，且台灣上空大氣環境並無明顯水氣存在，故初步推論五分山氣象雷達應受大氣折射影響，導致雷達電磁波向下傳播到達海面而形成假回波。由於本研究個案發生期間，台灣地區並無加強觀測資料，故以氣象模式進行模擬，重建個案發生期間台灣地區大氣環境變化狀況，配合現有理論及工具進行探討及研究，藉以說明雷達異常回波與大氣環境之關係。

本研究使用的模式為 Weather Research and Forecasting Model (以下簡稱 WRF)，是目前發展的最新一代中尺度數值模式，相關資訊請參閱 WRF 網站。大氣科學現象的研究，需要分析的環境參數非常多，氣象研究人員通常採用專屬的繪圖系統如 NCAR Graphic(ngwww.ucar.edu)，透過不同型式的圖表加以判斷天氣現象，該系統功能強大，但以大量的繪圖指令及設定(scripts)輸出圖表與文字，通常讓使用者無法很快的熟悉操作，GIS 的圖形使用者介面(GUI)具有高度的親合性，可以繪製常用的天氣圖。WRF 模式輸出資料為 NetCDF 格式，可以依需要輸出所需要之氣象場，以地面天氣圖製作為例，則輸出各網格點經緯度座標(XLAT、XLONG)、混合比(QVAPOR)、高度(HGT)氣壓(PH、PHB)、風場(U、V)及溫度(T)等，經過程式計算海平面氣壓、風速、風向及地面溫度等，以 ASCII 檔案格式輸入 GIS，藉由 GIS 空間資料管理之功能，提供氣象場資料即時查詢功能。

圖 2 為 7 月 3 日 18 UTC 的地面天氣圖，台灣地區都在 1012 hPa 等壓線範圍，是典型夏季太平洋高壓脊籠罩的天氣狀況，大致是晴空無雲。色階顯示地面溫度( $^{\circ}\text{C}$ )，夜間陸地平地地面溫度介於 21-24 $^{\circ}\text{C}$ 之間，海面則介於 24-27 $^{\circ}\text{C}$ 之間，台灣東側海面大致為東南風及南風，西側則為西南風及南風，風速由南向北漸增，台灣北部最大風速約 20 kt( $10\text{ m s}^{-1}$ )，陸地風速則較小，應該是一個晴空無雲，輕風宜人的好天氣。運用 ArcView 簡便的查詢及對話視窗的設計，以滑鼠點選台灣西北部海面點位，圖 2 也顯示該點的垂直剖面資料可以發現，在高度 3000 m 以下的溫度及露點差都大於 3 $^{\circ}\text{C}$ ，由於顯示視窗限制無法顯示，在約 6000 m 高度的溫度及露點差甚至達 25 $^{\circ}\text{C}$ 以上，也說明該地區的大氣非常的乾燥，並沒有充分的水氣可以凝聚，甚至導致降水。此外，由於天氣圖中以風桿表示風速及風向，但其風速單位以 kt 為主，與一般公制單位( $\text{m s}^{-1}$ )不同，可以對先進行計算或轉換後再顯示在對話視窗中，符合使用者閱讀習慣。

透過 GIS，繪製等值線及以色階或符號顯示氣象場，達到氣象軟體的一般要求，另外，依照研究主題建立所需要的環境資料，可以即時獲得單點垂直剖面資料，有利研究人員以人機介面，透過簡便的方式查詢所需要的資料，此為目前個人電腦氣象資料分析軟體所欠缺之功能。

## 3. 資料整合與應用

由於經濟的發展，民生對氣象及環境資料的掌握更需精確，而觀測技術及儀器的增加，各類觀測資料間的整合與運用，對地球科學研究則為一大挑戰，美國 NCAR 亦積極將 GIS 技術導入大氣科學研究領域，期能在 GIS 建立空間資訊之共同作業平台。Kucera et al. (2004)以 GIS 模擬在不同地形解析度下，分析關島地區雷達波受地形阻擋效應；Krajewski et al. (2006)以 GIS 繪製美國 KRLX(Charleston, West Virginia)及 KEMX(Tucson, Arizon)兩雷達站，雷達波傳播與地形之關係，都有不錯的效果，然而，兩篇文章參考的大氣折射效應，只是一 km 高度以下的單點垂直剖面資料，且未輸入大氣實際觀測資料。Xie et al. (2005)在 GIS 設計 NEXRAD Level III 的降水觀測資料，而本研究則主要處理 Level II 的原始觀測資料。NOAA 提供了一些處理 NEXRAD 的 Java 工具，但是僅適用於美國地區，當輸入 RCWF 資料時，資因為投影問題而無法執行，而且 CWB 所屬雷達並不僅有 NEXRAD。為方便氣象資料之應用，本研究在 Windows 環境下，以地理資訊系統(ArcView)整合雷達及衛星觀測、模式模擬及地理資料，並在地理資訊系統進行射線軌跡模擬。

### (1) 觀測資料轉換與分析

氣象雷達觀測與實際天氣有不一致的現象，必須

藉由其他氣象資料進行驗證，爲了驗證個案發生期間，台灣海峽北部是否真的有發生明顯對流系統的可能性，並將不同種類的氣象觀測資料輸入到 GIS 中，本研究則將雷達及 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)的觀測資料經過轉換，以利於分析與比較。

TRMM 衛星的水平解析度爲 10 km，且搭載有 TMI (TRMM Microwave Imager) 等等儀器，爲大氣科學研究提供豐富的觀測資料 (摘自 TRMM 網站)。該衛星在個案期間通過台灣地區時間有三個時段 (0304、0322、0403 UTC)，本研究以 TRMM 衛星的 TMI 資料組爲例，資料格式爲 HDF，爲便利衛星資料整合於 GIS，本研究設計資料自動解算功能，藉由 ArcView 檔案對話視窗，選取個案時間的 TMI 資料檔案，設定資料種類 (以 LowResCH 爲例)，利用外部撰寫好的程式進行計算，建立可以由輸入 ArcView 所需要的 ASCII 文字檔，內容包含空間座標、觀測資料或反演結果，即可在 GIS 中建立圖層。而設計此功能之特點，雖然沒有全自動的處理功能，但簡單的程式設計方式，氣象人員可以在最短的時間，依照研究需要進行修改，在 GIS 中建立所需要的衛星資料，而且 HDF 提供 Windows 使用的 Library，目前僅適用於 C 語言及特定的編譯器，一般氣象研究人員在 Windows 系統中使用並不方便。

五分山 WSR-88D 氣象雷達掃描原始資料，則利用美國太空總署 (NASA) TRMM Satellite Validation Office 所提供之 Radar Software Library，在 Linux 環境轉換爲通用格式 (UF, Universal Format)，由於地球爲一橢球體，精確的地理位置計算，則必須考慮觀測點在地球之經緯度位置，而其位置亦須投影至橢球面上。以五分山雷達爲中心，利用大地座標換算公式 (Rapp, 1991) 賦予每一段雷達波空間座標，並假設在標準大氣狀況下，電磁波以 4/3 地球曲率半徑傳播，進而換算其高度。以 070322 UTC 爲例，圖 3 爲該時間的雷達回波圖，而五分山雷達原始資料經過轉換，可以解算出每一個掃描仰角 (共 10 個仰角)，於各方向之回波值，網格水平距離 1km (如圖 3)。

陳等 (2004) 統計台灣鄰近地區 2002 至 2004 年 7~10 月間的資料。他們發現在海上晴空無雨的情況下，由 TRMM/TMI 相同頻道資料求得水氣含量大約是介於  $37\sim 49\text{ g m}^{-2}$  之間。在 GIS 中，利用所提出微波資料計算海上水氣含量的公式，換算相對於地面雷達線狀回波 (長約 250 km、寬約 90 km) 出現位置上空的水氣含量，以 7 月 3 日 22 UTC 爲例，如圖 3 所示。當時雷達站西北方仍出現明顯雷達回波，圖 4 爲透過圖 3 之過程所建立的 TMI 觀測資料圖層，其中紅點代表 TMI 觀測資料，方塊爲雷達回波出現位置。TMI 資料位於雷達回波區內共有資料 184 點，水氣含量介於  $27.5$  到  $34.0\text{ g m}^{-2}$  之間 (平均爲  $29.95\text{ g m}^{-2}$ )，這表示該區域屬於晴空無雨的環境，也說明雷達回波區內並沒有真實的水粒子存在，該雷達回波並非真正的

天氣回波。圖 6 也同時顯示雷達及 TMI 觀測資料，GIS 以圖層的方式管理資料，可以藉由同時顯示視窗方式，提供不同資料間比較與分析的功能，所以 GIS 對氣象觀測資料分析是一有利的工具。

## (2) 大氣折射效應圖製作

爲了有效提供三度空間所有的折射效應資訊於平面地理分布圖上，我們僅顯示陷捕層位置，在天氣預報作業中，提供雷達守視人員參考。圖 5 爲 7 月 3 日 15 UTC 及 7 月 4 日 04 UTC 的雷達回波合成圖及大氣折射效應圖，由圖 5 可以知道在雷達站西北方約 100 km 處出現雷達回波，而此時雷達站有陷捕的現象，但在台灣陸地週邊則無明顯的導管層出現，可以推論當電磁波由雷達站射出後，並未按照理論高度傳播 (4/3 地球曲率半徑)，所以在比較短的距離到達海面。到了 7 月 4 日 00 UTC，台灣附近海面幾乎布滿強度不同的陷捕層，而台灣西側沿海更爲明顯，而此時雷達站並無陷捕現象，電磁波的傳播路徑比較高，但到達海面進入因暖濕空氣造成的陷捕層，所以雷達回波位置更遠離雷達站西北方。

陷捕層的分布與雷達觀測結果一致，且與 Atkinson et. al (2001) 對波斯灣 (Persian Gulf) 模擬結果類似，也就是說在海峽上隨時存在著不同高度的大氣導管。圖 5 除了提供五分山雷達站可能存在導管分布圖，也可以提供其他各地雷達站可能出現的大氣折射效應，而且也可以看出因爲台灣地理位置關係，受到西南氣流吹送暖濕空氣，海面上陷捕層約略與台灣海岸平行，所以造成雷達回波狹長形狀，而且與平行於地形。

## (3) 射線軌跡模擬

Gabella and Perno (1998) 以 Fortran 撰寫程式，在數值地形 (DEM) 模擬雷達波在標準大氣狀況下受地形影響狀況，但由於受限於當時電腦運算速度及大氣資料獲得方式，也僅能以單點垂直剖面進行模擬，因電腦硬體及 GIS 的發展，相信現在可以有更好的成果。美軍 AREPS 可以利用單點模擬單一方向的射線軌跡，但大氣環境並非規則不變的，再者網路版本 AREPS 並未提供大區域氣象資料模擬的功能，故本研究更進一步運用 WRF 輸出結果，在 GIS 中進行射線軌跡模擬。AREPS 射線軌跡理論 (Patterson et al., 1994) 中，本研究假定雷達波傳播水平間隔爲 5km，並據以求得每 km 之高度及仰角變化，並賦予空間座標。本研究主要針對雷達站西北側雷達波到達海面的位置及受到地形影響狀況，僅就方位角  $200^\circ$  到  $10^\circ$  (順時針) 方向進行射線軌跡模擬，每一射線間隔 5 度，當雷達波到達海面及低於地形高度時，則停止繼續傳播，地形則採用 WRF 模擬所設定的高度，雷達高度爲地形高度以上 15 m。射線軌跡則配合 WRF 模擬網格，由雷達站每 5 km 積分至 230 km，積分過程中，以 Arcview "SelectByPoint" 指令選取該點位的地形高度及垂直剖面，由射線高度求得模擬所得到的折射

率梯度 ( $dM/dh$ )。另外，考量經由氣象模式模擬導管強度結果通常偏弱，所以對導管強度有所加強，圖 6 為射線軌跡模擬結果。

由圖 6 中 7 月 3 日 18 UTC C 的模擬， $0.5^\circ$  仰角射線由於受到南方山脈阻擋，方位角  $200^\circ$  到  $235^\circ$  均無法穿越地形，而  $265^\circ$  到  $10^\circ$  則因進入到達海面的導管層，所以高度明顯下降。而圖 10b 中， $1.5^\circ$  仰角則有  $205^\circ$ 、 $215^\circ$  及  $200^\circ$  方向受到地形阻擋，其餘均可以到達海面，而在  $255^\circ$  到  $10^\circ$  度方向也都受到陷捕效應，射線高度逐漸降低到海面上，受到導管影響之射線則偏南  $10^\circ$ ，所以也造成  $1.5^\circ$  仰角回波較為偏南。在兩個仰角中， $300^\circ$  及  $305^\circ$  兩個方向也都受到大屯山系的影響，射線亦無法到達海面。而從圖 10c 的 3D 顯示中，可以看出射線到達海面上之後則明顯下降，更顯示射線軌跡與雷達回波位置的關係，也說明了雷達觀測結果是一異常回波。利用相同的設定對 7 月 4 日 00 UTC 進行分析，圖 10d 的  $0.5^\circ$  度仰角模擬中， $200^\circ$  到  $255^\circ$  方位角均受到南方山脈阻擋，而  $290^\circ$  到  $310^\circ$  方向也受到山系阻擋而無法到達海面，比 7 月 4 日 18 UTC 明顯，與實際雷達觀測結果相符。在圖 10e 的  $1.5^\circ$  仰角模擬中，受到地形阻擋角度明顯減少，南方所有射線均通過地形，而也僅有  $300^\circ$  到  $310^\circ$  方向到山系影響，但此一仰角回波並不明顯，射線同樣在概略位置到達海面，顯然對於導管強度加強的設定，仍有待調整與測試。

在 Atkinson et al. (2001)、Haack et al. (2001) 的模擬結果中，都有導管強度偏弱及高度偏低的特性，本研究為配合探討地形之影響，所以並沒有特意改變雷達所在高度，僅調整導管強度。從射線軌跡的推論中，五分山真實地形高度約 740 m，雷達波大約在 120 km 的距離到達海面，從仰角  $0.5^\circ$  及  $1.5^\circ$  到向下的射線角度， $dM/dh$  達 -250 M-unit  $\text{Km}^{-1}$  以上。雷達射線經過不同距離的陸地後進入海面，所以本研究在程式設計中，參考模式模擬所得結果，雷達站 25 km 內導管現象比較明顯，所以加強其導管強度，使得射線高度不致過高，而無法進入海面導管層。射線能夠到達海面，海面上的導管也是重要的關鍵，所以也特意調整海上區域的導管強度，在射線角度未變為負值狀況下，只要  $dM/dh < 0$ ，則設定射線高度降低，特意增強導管強度。雷達波的傳播受複雜的大氣環境及地形所影響，而氣象模式為各種物理現象模擬之結果，本研究在射線軌跡的模擬與  $dM/dh$  的調整，可提供日後模式參數調整及相關研究的參考。

## 5. 討論與結論

本研究針對 2003 年 7 月 3 日夜間，五分山氣象雷達所觀測到台灣海峽北部上的異常回波，運用 WRF 模式進行大氣環境的模擬與重建。配合研究需要，在 GIS 中整合了雷達、TRMM 觀測資料以及 WRF 模擬結

果，充分運用 GIS 功能於氣象資料分析與統計，在 GIS 中更進一步延伸氣象模式資料的應用，除提供 AREPS 進行大氣折射效應計算外，更在 GIS 中進行射線軌跡模擬。而從研究過程中可以得到以下結論：

1. 由 WRF 模擬結果可以發現，電磁波自雷達射出後，射線高度並未到達理論高度，而當雷達波離開陸地到達海面時，通過氣象模式模擬所得海面存在的陷捕層，雷達波進入陷捕層中且射線軌跡往下行進到達海面，遂以造成假回波現象。
2. 透過 GIS 的資料整合平台，經過設計簡單的程式就可以建立所需要的分析資料，而 GIS 對空間資料計算、分析及管理的功能，則可提供氣象研究人員強大的工具。
3. 主題圖的製作可以讓研究人員對研究內容有更深刻的了解，而 GIS 強大的地理資料管理，結合氣象資料的展示，可以清楚的表達大氣環境的變化。
4. 透過射線軌跡的模擬，可以了解射線軌跡與雷達回波的關係，更可透過氣象模式的預報，提供雷達作業人員對於天氣變化及裝備效能的掌握，而相關的專家系統則有待進一步開發。

本研究採用 GIS 對氣象模式、雷達及衛星等觀測資料進行整合，提供氣象資料查詢及輸出功能，系統非常容易可以連結 AREPS 及進行電磁波模擬，而藉由 GIS 強大的空間資訊管理功能，可以針對電磁波傳播有更細膩的掌握。然氣象資料具有四維特性(空間及時間)，資料種類多且龐大，對現有個人電腦運算仍是一大考驗，期望日後電腦硬體技術改良，提供更快速之運算能力；此外，本研究所展現的 GIS 應用成果，可以提供氣象研究人員在資料管理、分析、擷取及顯示各方面有新的觀念與技術，相信對於科學現象的研究有莫大助益。

### 參考資料

- 丘台光與陳嘉榮，2003：短時預報系統產品校驗。天氣分析與預報研討會論文集編，63-68。
- 林淑玲，"宜蘭地區颱風降雨與地形、空間分布關係之探討"，碩士論文，國立中興大學水土保持學系，台中，89頁，2002。
- 涂建翊與余嘉裕，1997：台灣地區降水之時空氣候特徵。氣象預報與分析，152，23-33。
- 曾淑惠，"地理資訊系統在空氣品質預測模型建構上之應用研究"，碩士論文，元智大學機械工程研究所，桃園，110頁，2000。
- 陳文定，"氣象情資應用於SCIPUFF生化擴散模擬系統之最佳化研究"，碩士論文，中華大學科技管理研究所，新竹，98頁，2004。
- 陳啓南，"網際網路地圖資料供應系統建立之研究"，碩士論文，中正理工學院軍事工程研究所，桃園，107頁，2001。
- 陳萬金、胡仁基、劉振榮、張茂興，2006：利用TMI微波頻道反演海上颱風定暈降水之研究。大氣科

學, 34, 67-88。

鄭力嘉, "地理資訊系統於石門水庫集水區降雨逕流分析之應用", 中原大學土木工程研究所碩士論文, 桃園, 94頁, 2004。

謝侑璋, "安平港『海岸環境資訊管理系統』建置之研究", 碩士論文, 中華大學營建管理研究所, 新竹, 93頁, 2005。

Atkinson, B. W., J.-G. Li, and R. S. Plant, 2001. Numerical Modeling of the Propagation Environment in the Atmospheric Boundary Layer over the Persian Gulf, *Journal of Applied Meteorology* (40), 586-603.

Gabella M. and G. Perno, 1998: Simulation of the Orographic Influence on Weather Radar Using a Geometric-Optics Approach, *J. Atmos. and Ocean. Tech.*, 15, 1485-1494

Haack, T. and Burk, S. D. "Summertime Marine Refractivity Conditions along Coastal California," *J. Appl. Meteor.* 40, 673-687., 2001.

Habermann T., "What Is GIS (for Unidata)?" *Bulletin of the American Meteorological Society*: Vol. 86, No. 2, 174-175., 2005.

Kucera, P. A., Krajewski, W. F. and Toung, C. B., 2004. Radar Beam Occultation Studies Using GIS and DEM Technology: An Example Study of Guam, *Journal of Atmospheric and Ocean Technology* (21), 995-1006. Ng, S. P., Dimitroulopoulou, C., Grossinho, A., Chen, L. C. and Kendall M., 2005. PM<sub>2.5</sub> exposure assessment of the population in Lower Manhattan area of New York City after the World Trade Center disaster, *Atmospheric Environment* (39) 11, 1979-1992

Patterson, W. L., Hattan, C. P., Lindem, G. E. R., Paulus, A., Hitney, H. V., Anderson, K. D. and Barrios, A. E., 1994. Engineer's Refractive Effects Prediction System (EREPS), Technical Document 2648, 1994.

Petty, G. W., 1994: Physical Retrievals of Over-Ocean Rain Rate from Multichannel Microwave Imagery. Part II: Algorithm Implementation, *Meteorology Atmosphere Physical*, Vol. 54, 101-121.

Ramamurthy M., "Unidata's Blueprint for 2008.," *Bulletin of the American Meteorological Society*: Vol. 86, No. 2, 179-180., 2005.

Rapp, H. Richard, 1991. Geometric Geodesy, Part I, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, 178-190. Shipley T. S., "GIS Applications in Meteorology, or Adventures in a Parallel Universe.," *Bulletin of the American Meteorological Society*: Vol. 86, No. 2, 171-173., 2005.

Rinehart E. R., 1997. Radar for Meteorologists, Third Edition, Rinehart Publications, 418pp.

Siddiqui, M. N., Jamil, Z., Afsar, J. 2004. Monitoring changes in riverine forests of Sindh-Pakistan using remote sensing and GIS techniques, *Advances in Space Research* (33) 3, 333-337

Wilhelmi V. O. and J. C. Brunskill, "Geographic Information Systems in weather, climate and impacts," *Bulletin of the American Meteorological*

*Society*: Vol. 84, No.10, pp. 1409-1414., 2003.

Wilhelmi V. O and Terri L. Betancourt. "Evolution of NCAR's GIS Initiative: Demonstration of GIS Interoperability." *Bulletin of the American Meteorological Society*: Vol. 86, No. 2, 176-178., 2005.

Xie, H. J., Zhou, X. B., Vivoni, E. R., Hendrickx M. H. and Small, E. E., 2005. GIS-Based NEXRAD Stage III Precipitation Database: Automated Approaches for Data Processing and Visualization, *Computers & Geosciences* (31), 65-76.

Yuan M., "Beyond Mapping in GIS Applications to Environmental Analysis." *Bulletin of the American Meteorological Society*: Vol. 86, No. 2, 169-170., 2005.

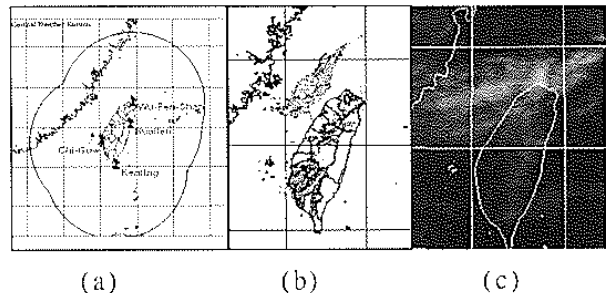


圖1 中央氣象局雷達觀測網及2003年7月3日18 UTC觀測資料, 由左至右分別為台灣地區氣象雷達觀測網, 紅線表示監控範圍、雷達回波圖, 紅外線雲圖(資料來源: 中央氣象局)

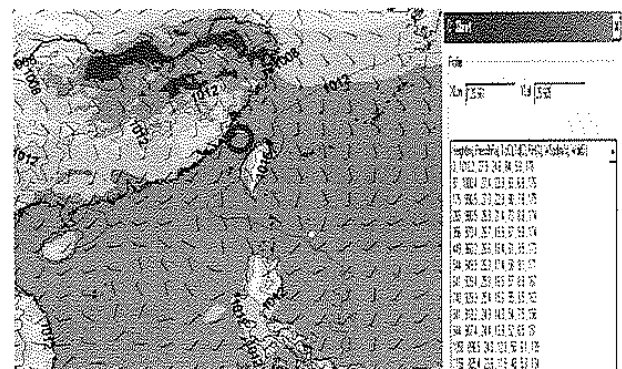


圖2 2003年7月3日18 UTC台灣地區天氣圖, 紅色等值線為海平面氣壓(hPa), 間隔為4hPa, 色階表示地面溫度(C), 以深淺表示溫度高低, 色階間隔為3度。右側為台灣西北部海面單點大氣垂直剖面, 標示有經緯度座標, 氣象場由左至右分別為高度(m)、壓力(hPa)、溫度(C)、露點溫度(C)、相對溼度(%)、風速(m/s)及風向(D)。

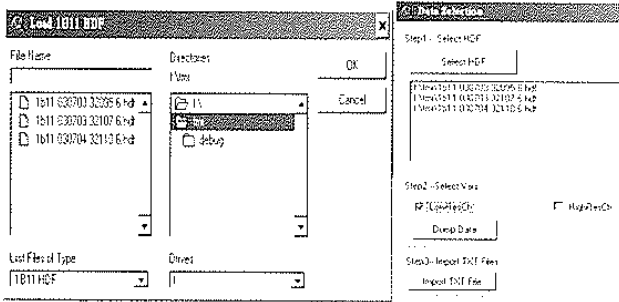


圖3 TRMM TMI資料輸入GIS畫面選取檔案及計算資料

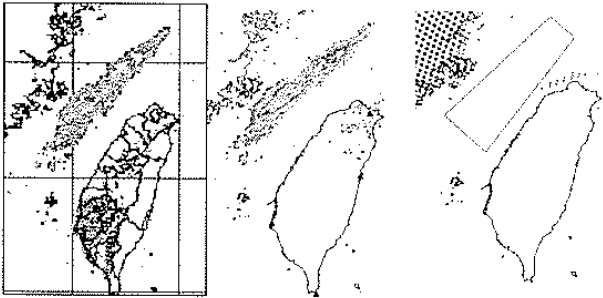
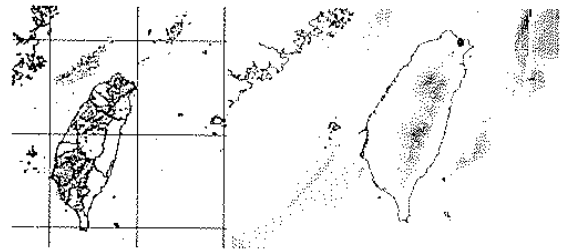
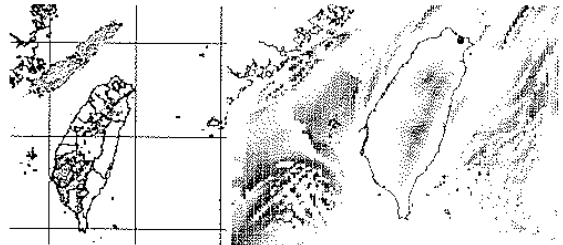


圖4 2003年030722 UTC 氣象觀測資料，由左至右分別為五分山氣象雷達降水回波合成圖、在GIS中顯示五分山雷達0.5°仰角觀測資料及由TRMM TMI推算所得水氣含量，紅點代表觀測資料，方框為雷達回波出現位置，黃點為位於雷達回波位置之觀測點。

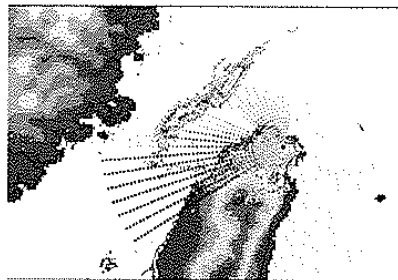


(a)

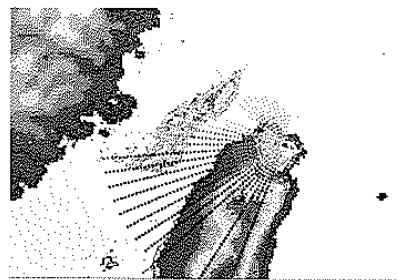


(b)

圖5 雷達回波合成圖及大氣折射效應圖，(a)為73日15 UTC，(b)為7月4日 00 UTC。大氣折射效應圖中，綠色為地形高度，深淺表示高低，橙色為大氣折射效應，深淺代表強度。



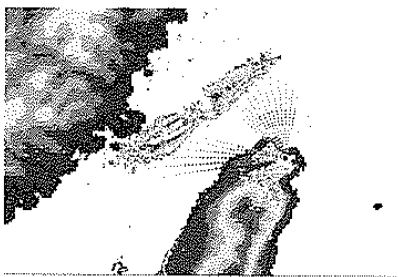
(a)



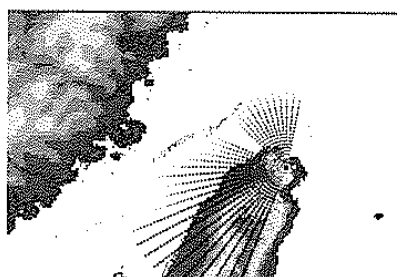
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

圖6 雷達波射線軌跡模擬及雷達回波圖，(a)~(c)分別為7月3日18 UTC的0.5°、1.5°仰角射線軌跡平面圖及3D模擬結果，(d)~(f)則為7月4日00 UTC。在平面圖中，紅色點為射線軌跡，每點間距為5 km，高度則以深淺表示；3D圖中，藍色線表1.5°仰角，紅色線則表0.5°仰角，同時亦顯示0.5°仰角雷達回波位置。視線是由雷達站東北方向雷達站方向，為增加視覺效果，垂直誇大約100倍。